



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

PIETARI KARVONEN  
3D-SKANNAUSTEKNIIKOIDEN VERTAILU  
Kandidaatintyö

Tarkastaja: Jorma Vihinen

## TIIVISTELMÄ

**Pietari Karvonen:** 3D-skannaustekniikoiden vertailu, Comparison of 3D scanning techniques

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 25 sivua, 1 liitesivua

Marraskuu 2017

Konetekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Teknillinen suunnittelu

Tarkastaja: Tutkimuspäällikkö Jorma Vihinen

Avainsanat: 3D-skannaus, optinen skannaus, strukturoitu valo, laser

3D-skannereiden määrä teollisuudessa on lisääntynyt viime vuosina. Skannereita käytetään hyväksi laadun valvonnassa, rekonstruoinnissa ja suunnittelun apuna. 3D-skannauksen avulla kappaleesta voidaan luoda nopeasti 3D-malli tietokoneelle.

Tässä työssä vertailtiin kolmea eri skanneria ja skannaustekniikkaa. Työssä käytetyt skannerit olivat Hexagon HP-L-20,8, Creaform HandySCAN ja GOM ATOS Core. Skannaukset suoritettiin Tampereen teknillisellä yliopistolla, Tampereen ammattikorkeakoululla ja Vammalan ammattikoululla. Skannattava kappale oli Tampereen teknillisen yliopiston valmistama NAS-kappale. NAS-kappale skannattiin jokaisella skannerilla, jonka jälkeen skannausdata siirrettiin tietokoneelle. Tuloksia tarkasteltiin PolyWorks Inspector 2016 sovelluksella. NAS-kappaleesta oli valittu tietyt piirteet, joiden mittaustarkkuutta tarkasteltiin ja verrattiin NAS-kappaleen työkuvan mittoihin.

Jokaisella skannerilla esiintyi jonkin verran poikkeamaa työkuvan mittoihin nähden. Syynä pienelle poikkeamalle saattaa olla mittausvirheet, joita aiheutui kokemattomuudesta, ympäristöstä sekä NAS-kappaleen pinnalle suihkutetusta peiteväristä. Skannereita ei voida laittaa paremmuusjärjestykseen, koska kyseessä oli yksittäinen mittaustarkkuus ja koska skannerit hyödyntävät eri skannaustekniikkaa, jonka vuoksi niille löytyy teollisuudesta eri sovelluskohteet.

## SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	1
2. 3D-SKANNAUS .....	2
2.1 Yleistä.....	2
2.2 Kontaktiton .....	3
2.3 Eri skannereita .....	5
3. TESTIKAPPALEEN SKANNAUSMENETELMÄT .....	7
3.1 Skannattava kappale .....	7
3.2 Käytettävät skannerit .....	8
4. SKANNAUSTEN SUORITUS.....	11
4.1 Hexagon HP-L-20,8.....	11
4.2 GOM ATOS Core.....	13
4.3 Creaform HandySCAN.....	15
5. TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU .....	18
5.1 PolyWorks .....	18
5.2 Tulokset .....	19
5.3 Mittaustuloksiin vaikuttavia tekijöitä .....	22
6. YHTEENVETO .....	24
LÄHTEET .....	25
LIITTEET	

**KÄSITTEET:**

2D: kaksiulotteinen

3D: kolmeulotteinen

CAD: tietokoneavusteinen suunnittelu

CMM: coordiante measuring machine

# 1. JOHDANTO

3D-skannereiden käyttö on yleistynyt viime vuosina. 3D-skannereita käytetään yhä enemmän arkeologisten kohteiden taltioimiseen, laadun valvontaan sekä suunnittelun apuna.

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on tarkastella eri 3D-skannaustekniikoita ja vertailla erilaisten skannereiden mittaustarkkuuksia ja helppokäyttöisyyttä. Työssä keskitytään optisiin skannausmenetelmiin, kuten laserskannaukseen ja struktuurisen valon käyttöön. Työssä esitellään kädessä pidettäviä skannereita, käsivarsi skannereita sekä täysin paikallaan pidettäviä skannereita.

Tässä työssä skannattavaksi kappaleeksi valittiin NAS-kappale, sillä se sisältää hyvin erilaisia muotoja. Skannaamalla tällaista kappaletta huomattiin, että tietyt pinnan muodot aiheuttavat enemmän haasteita skannattaessa kuin toiset. Mittaukset on suoritettu Tampereen teknillisellä yliopistolla, Sastamalan ammattikoululla ja Tampereen ammattikorkeakoululla. Mittaustulokset siirrettiin tietokoneelle, jonka avulla dataa analysoitiin. Tässä tutkimuksessa on kiinnitetty erityistä huomiota skannereiden mittaustarkkuuksiin ja kuinka ne vastaavat valmistajien ilmoittamia tarkkuuksia.

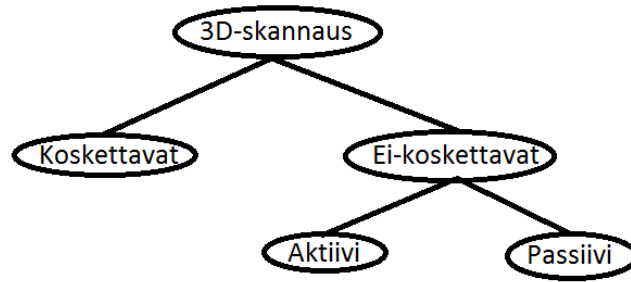
## 2. 3D-SKANNAUS

### 2.1 Yleistä

3D-skannaus on yleistynyt paljon viime vuosina, koska skannereiden hinnat ovat laskeutuneet (Bernardini & Rushmeier 2002). Vaikka skannauksessa hyödynnettävä tekniikka on kehittynyt huomattavasti viime vuosina, kehitysprosessi ei ole kuitenkaan edennyt odotetulla nopeudella. Syynä tähän voidaan pitää vieläkin kohtalaisen korkeita hintoja, koska 3D-skannereiden hintoja ei ole vielä saatu niin matalalle, että normaali kuluttaja ostaisi tuotetta (Rocchini et al. 2001). 3D-skanneri poikkeaa normaalista digitaalikamerasta vain vähän. Normaalin kameran tallentaessa 2D-kuvaa 3D-skanneri kerää kuvattavasta kohteesta tuhansia tai satojatuhansia pisteitä ja pyrkii määrittämään pisteiden sijainnin x-, y- ja z-koordinaatistossa. 3D-skannerin keräämiä pisteitä kutsutaan yleisesti pistepilveksi (Geng 2015). Pistepilvestä voidaan muodostaa sopivaa ohjelmistoa hyödyntäen kolmiulotteinen malli skannatusta kappaleesta (Lykhin 2015).

3D-skannaukselle on monia käyttökohteita. Skannausta hyödynnetään esimerkiksi historiallisten kohteiden taltioinnissa, laadun valvonnassa, rekonstruoinnissa, elokuva- ja peliteollisuudessa sekä suunnittelun apuna (Boehler & Marbs 2002; Lykhin 2015; Geng 2015; 3DScanco 2017). Historiallisten kohteiden skannauksen ansiosta skannattua esinettä voidaan tutkia ympäri maailmaa, ilman että täytyy matkustaa paikan päälle. Laadun valvonnassa kappale skannataan ja saatua mallia verrataan suunnitteluvaiheen piirustuksiin. Vertailemalla tuloksia voidaan selvittää esimerkiksi valmistusprosessin tarkkuutta tai kappaleen kulumista. 3D-skannausta käytetään myös kappaleiden rekonstruoinnissa, kun kappaleesta ei löydy piirustuksia tai ne eivät ole digitaalisessa muodossa. 3D-skannauksen avulla kappaleen mitat saadaan perinteisiä mittamenetelmiä nopeammin (Lykhin 2015).

3D-skannaustekniikat voidaan jakaa kahteen pääryhmään: koskettaviin (contact) ja ei-koskettaviin (non-contact) skannereihin (Geng 2015). Koskettavia skannereita ovat esimerkiksi teollisuudessa paljon käytetyt CMM-mittalaitteet. Tässä työssä käsitellään vain ei-koskettavia skannereita eli optisia skannereita, sillä mittauksissa käytettävät skannerit ovat optisia skannereita. Optiset skannerit voidaan jakaa vielä passiivisiin ja aktiivisiin skannereihin sen perusteella, lähettävätkö ne säteilyä (Geng 2015).



**Kuva 1.** 3D-skannauksen alalajit

Kuvassa (1) on esitetty 3D-skannauksen alalajit. Tässä työssä on käytetty vain ei-koskettavia skannausmenetelmiä eli optista skannausta. Alaluvussa 2.2 on käsitelty tarkemmin ei-koskettavien eli kontaktittomien skannereiden toimintaa.

## 2.2 Kontaktiton

*Passiiviset skannerit* eivät itsestään lähetä säteilyä, vaan hyödyntävät ympäristön säteilyä. Monet passiiviset skannerit hyödyntävät näkyvää valoa. Passiiviset skannerit voivat olla stereoskooppisia, fotometrisiä tai siluetteja. Stereoskooppisessa menetelmässä voidaan käyttää kahta kameraa, joilla otetaan kuvia eri puolilta kappaletta. Kahden kameran ansiosta periaate on verrattavissa ihmisen stereonäköön. Fotometrisessä menetelmässä käytetään vain yhtä kameraa, jolla otetaan useita kuvia eri valaistuksissa. Siluettimenetelmässä kappaleesta otetaan kuvia korkeakонтрастista taustaa vasten (Santaluoto 2012; Geng 2015). Kuvat syötetään koneelle, joka muodostaa kappaleesta 3D-mallin.

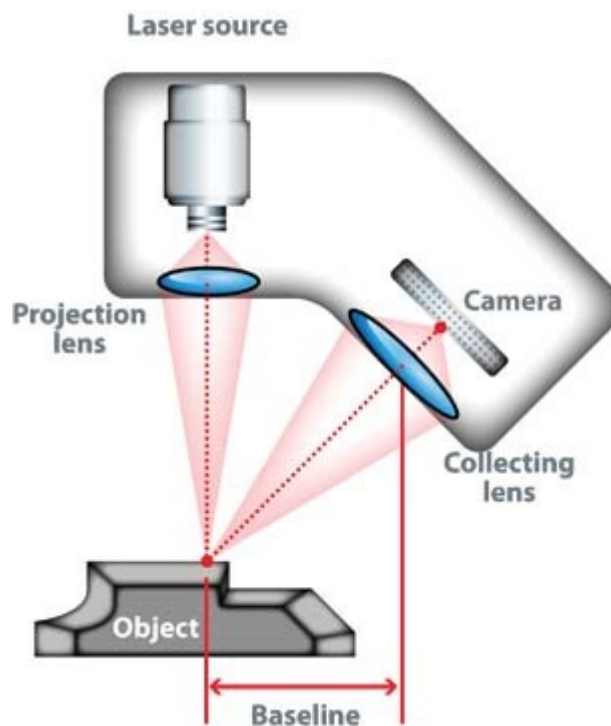
*Aktiiviset skannerit* poikkeavat passiivisista skannereista siinä, että ne lähettävät joko valoa, ultraääntä, röntgensäteilyä tai lasersäteilyä (Santaluoto 2012). Laseria hyödynnettäessä mittaus perustuu joko *säteen kulkunopeuteen*, *kolmiomittaukseen* tai *vaihe-eroon* (Boehler & Marbs 2002).

*Kulkunopeuteen* perustuvassa menetelmässä skanneri lähettää laserpulssin kohti kappaletta ja mittaa aikaa, kunnes skanneri havaitsee takaisin heijastuneen säteen uudelleen. Koska valonnopeus  $c$  tiedetään, täytyy skannerin laskea vain pulssin heijastumiseen kulunut aika  $t$ . Pisteiden etäisyys skannerista saadaan täten helposti kaavan (1) avulla:

$$d = \frac{ct}{2}, \quad (1)$$

jossa  $d$  on pisteen etäisyys skannerista (Geng 2015). Valon kulkunopeuteen perustuvan skannausmenetelmän ongelmana onkin juuri ajan mittaaminen. Jos etäisyys mitattavan kappaleen ja skannerin välillä on lyhyt, muodostuu vaikeudeksi hyvin lyhyen ajan mittaaminen. Tämä aiheuttaa epätarkkuutta mittauksessa. Lähetetty säde saattaa myös kim-mota kappaleen pinnasta väärään suuntaan tai palata sensoriin kahdesta eri suunnasta yhtä aikaa. Tällöin sensori ei onnistu paikantamaan pisteen oikeaa sijaintia. Kulkunopeuteen perustuvilla 3D-laserskannereilla on hyvin pitkä kantosäde, ja se voikin ylittää jopa kilometreihin asti, minkä vuoksi sitä käytetään usein suurten, kuten siltojen tai maantieteellisten kohteiden mittaamiseen (Bernardini & Rushmeier 2002). Mittaustarkkuus kulkunopeuteen perustuvassa skannauksessa on yleensä noin millimetrin tarkkuudella.

*Kolmiomittausmenetelmä* perustuu säteilyä lähettävään lähteeseen sekä yhteen tai kahteen kameraan. Kappaleen pintaan lähetetään laserpiste tai viiva, jonka kamera havaitsee. Kameran ja säteilylähteen välinen etäisyys sekä laserin ja kameran välinen kulma ovat tiedossa. Riippuen laserpisteen paikasta kappaleen pinnalla kamera havaitsee pisteen eri kohdassa linssiä (Boehler & Marbs 2002; Geng 2015; 3DScanco 2017). Menetelmä saa nimensä säteilylähteen, kameran ja kappaleen pinnalla olevan pisteen muodostamasta kolmiosta. Toisin kuin valonnopeuteen perustuva mittaussuunnitelma, kolmiomittausmenetelmä soveltuu hyvin lähellä olevien kappaleiden skannaamiseen, mutta huonosti kaukana olevien kohteiden skannaamiseen. Kolmiomittauksessa onnistutaan skannaamaan noin mikrometrin tarkkuudella (Geng 2015). Kuvassa (2) on esitetty kolmiomittauksen perusperiaate.



**Kuva 2.** Kolmiomittauksen perusperiaate (Sniderman 2010)



*Strukturoitua valoa* käyttävä menetelmä poikkeaa kolmiolasermittausmenetelmästä, siten että laserin sijaan se lähettää valoa mitattavaan kappaleeseen. Strukturoidun valon menetelmässä hyödynnetään kahta kameraa ja yhtä projektoria. Projektori lähettää kappaleeseen valoviivoja, jotka heijastuvat kameroihin. Skanneri laskee kappaleen etäisyyden vertailemalla heijastuneita viivoja lähetettyihin viivoihin. Skannauksen tarkkuutta voidaan säätää muuttamalla lähetettyjen viivojen leveyttä. Strukturoidun valon käytön hyviä puolia ovat sen kyky skannata useita pisteitä tai koko näkymä kerralla sekä nopeus verrattuna laserimenetelmään. (Geng 2015)

## 2.3 Eri skannereita

Kädessä pidettävät skannerit ovat hyvin yleisiä teollisuudessa. Niiden toiminta perustuu kolmiomittaukseen, ja niitä käytetään erityisesti laadun valvonnassa ja käänteisessä suunnittelussa. Käytettäessä kädessä pidettävää skanneria käytetään ulkoista koordinaatistoa tai kappaleen pinnalle liitettyjä referenssipisteitä. Referenssipisteitä tarvitaan, jotta skanneri hahmottaa kappaleen sijainnin skannerin suhteen. Referenssipisteinä voidaan käyttää heijastavaa teippiä.



**Kuva 3.** Esimerkki kädessä pidettävästä skannerista. (Creaform 2017)

Mittakäsivarteen sidotut skannerit ovat toimintaperiaatteeltaan lähes samanlaisia kuin kädessä pidettävät skannerit. Erona on, että mittakäsivarren päässä oleva skanneri määrittää

oman sijaintinsa käsivarren tarkkojen koordinaattien mukaan eikä skanneri tarvitse referenssipisteitä tai ulkoista koordinaatistoa. Koordinaatisto muodostuu käsivarressa olevien anturien perusteella, minkä vuoksi skanneri pystyy paikantamaan avaruudessa sijaitsevan kappaleen sijainnin tarkasti suhteessa skannerin.

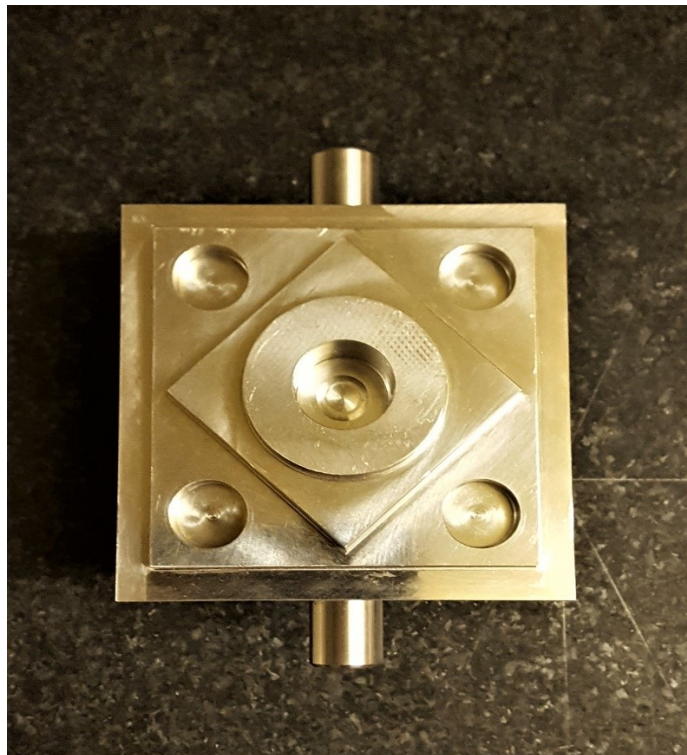


**Kuva 4.** Esimerkki käsivarsiskannerista (Hexagonmi 2017).

### 3. TESTIKAPPALEEN SKANNAUSMENETELMÄT

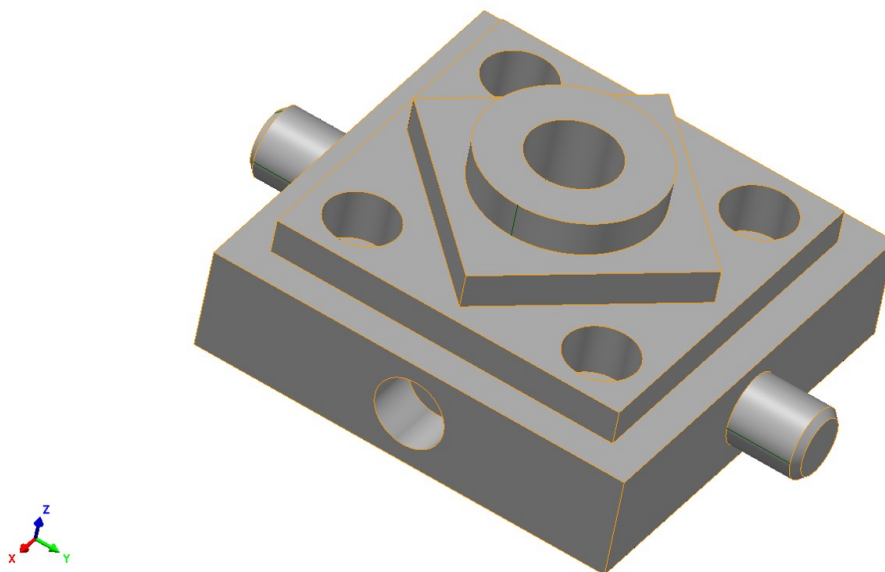
#### 3.1 Skannattava kappale

Mittauksissa on käytetty Tampereen teknillisen yliopiston valmistamaa NAS-kappaletta. NAS-kappaleita käytetään yleensä työstökoneiden tarkastukseen. Sen avulla nähdään, onko työstökone kalibroitu oikein ja ovatko työstön jäljet tarpeeksi hyviä. Mittauksessa käytetty NAS-kappale on valmistettu alumiinista, joka aiheutti osassa mittauksista ongelmia sen takia, että alumiininen pinta heijastaa valoa kovasti ja sen takia kaikki skannerit eivät meinanneet tunnistaa kappaletta.



*Kuva 5. Tutkimuksessa käytetty NAS-kappale*

Heijastusten poistamiseksi kappaleen pinnalle suihkutettiin ohut kerros ainetta, joka muutti pinnan mattapinnaksi. Kuvasta (14) nähdään, millaiselta peitevärillä värjätty kappale näyttää. Mittauksissa tarkastelun kohteiksi on valittu sivutappien halkaisija, reikien halkaisijat, reikien etäisyydet sekä kulmat tasojen välillä.



**Kuva 6.** CAD-malli NAS-kappaleesta

Testikappaleesta valmistettiin myös CAD-malli työkuvan mittojen perusteella. Kuvassa (6) on esitetty NAS-kappaleen tietokonemallinnus. CAD-mallia hyödynnettiin asettamalla sen päälle skannattumalli, jolloin voitiin muodostaa värikartta mallien välisistä poikkeamista. Saatu värikartta on esitetty luvussa 5.

### 3.2 Käytettävät skannerit

Tässä työssä mittaus suoritetaan kolmella eri skannerilla. Skannereiksi valikoitui Hexagon HP-L-20,8, Creaform HandySCAN ja GOM ATOS Core. Kaikki kolme edustavat eri menetelmää käyttäviä skannereita. Hexagon ja Creaform ovat molemmat laserkäyttöisiä ja GOM hyödyntää strukturoitua valoa.

Hexagon HP-L-20.8 on laserskanneri. Skannerin toiminta perustuu perinteiseen kolmiomittaukseen, jossa lähetetty lasersäde havaitaan kameralla. Muista käytetyistä skannereista poiketen Hexagon HP-L-20.8 on käsivarsiskanneri. Skanneri on kiinnitetty käsivarren päähän, mikä sitoo skannerin kiinni tiettyyn koordinaatistoon. Skanneri pystyy keräämään skannattavasta kappaleesta jopa 150,000 pistettä sekunnissa, ja sen skannausviivan pituus on 220 mm. Skannerin hyviä puolia ovat sen helppokäyttöisyys, sillä koordinaatistoa ei tarvitse erikseen asettaa. Käsivarsimekanismi takaa myös joka pisteelle tarkan

sijainnin xyz-koordinaatistossa. Skanneri soveltuu hyvin pienten ja keskikokoisten kappaleiden skannaamiseen. Hexagonin valmistajan kotisivuilla skannerin mittaustarkkuudeksi ilmoitetaan 0,013 mm (Hexagonmi 2017).



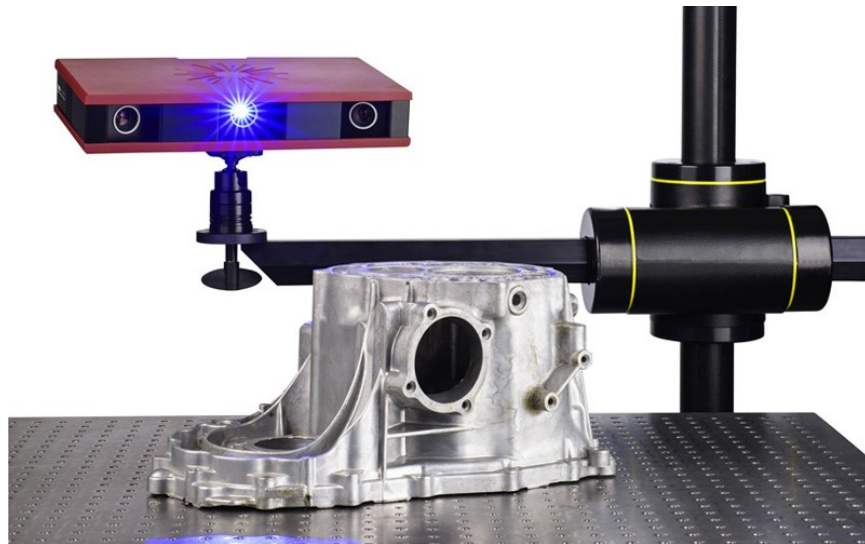
**Kuva 7.** Hexagon HP-L-20.8 käsivarsi skanneri (Hexagonmi 2017).

Creaform HandySCAN on myös kolmiomittaukseen perustuva skanneri. Skannerissa on keskellä laseri ja molemmissa päissä kamerat. Creaform HandySCAN ei ole Hexagon HP-L-20,8:n tavoin kiinni minkäänlaisessa käsivarressa, vaan on täysin vapaasti liikuteltava. Vapaa liikutettavuus mahdollistaa kaikenlaisten kohteiden mittaamisen. Kohteen paikantamiseksi kappaleeseen täytyy liittää referenssipisteitä, jolloin ulkoiset tekijät eivät vaikuta skannaukseen (mitaten.fi 2017). Valmistajan sivuilla skannerin mittaustarkkuudeksi ilmoitetaan 0,030 mm, mikä on hieman heikompi kuin Hexagonin tarjoama tarkkuus (creaform3d.com 2017). Creaformin sivulla kerrotaan myös, että HandySCAN on nopein skanneri markkinoilla ja pystyy suorittamaan 480,000 mittausta sekunnissa.



**Kuva 8.** Creaform HandySCAN kädessä pidettävä skanneri (Creaform 2017).

Kolmantena skannerina tässä työssä käytetään GOM ATOS Corea. Skannerin toiminta perustuu valonlähteeseen ja kahteen kameraan. Laserin sijasta skanneri käyttää sinistä valoa. Sinisen valon käyttö mittauksessa poistaa ympäristöstä tulevan valon häiritsevyydet (cascade,se 2017). GOM ATOS Core soveltuu pienten kappaleiden mittaamiseen hyvin. Maahantuojan sivulla mittaustarkkuudeksi ilmoitetaan 0,02–0,19 mm. ATOS Coren mittaustarkkuus sijoittuu Hexagonin ja Creaformin väliin.



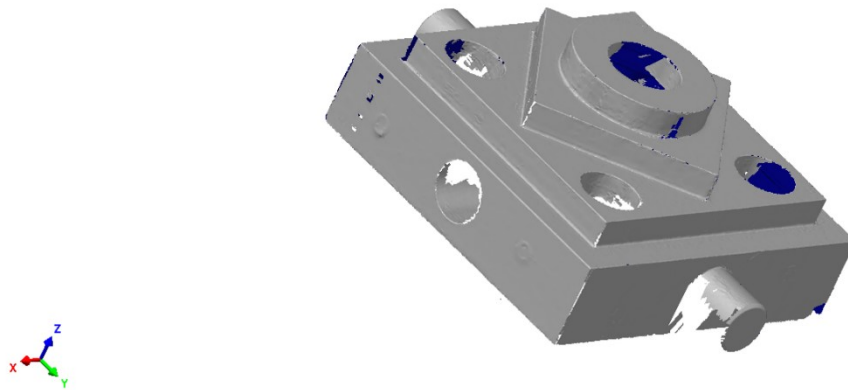
**Kuva 9.** GOM ATOS Core (cascade 2017)

## 4. SKANNAUSTEN SUORITUS

### 4.1 Hexagon HP-L-20,8

Ensimmäinen mittaus suoritettiin Hexagon HP-L-20,8:lla. Laiteella päästiin mittaamaan Tampereen Teknillisellä yliopistolla Konetalon alakerran mittauslaboratoriossa. Skanneri oli kytketty suoraan tietokoneeseen, jossa mittaustuloksia keräämään käytettiin Poly-Works sovellusta. Hexagonin käsivarsiskannerilla mitattaessa NAS-kappaletta ei tarvinnut pinnoittaa, eikä siihen tarvinnut lisätä referenssipisteitä. Tämän vuoksi mittausten suoritus oli hyvin yksinkertaista ja laitteen käyttö helppokäyttöistä, vaikka kyseessä oli ensimmäinen mittaus ilman aikaisempaa kokemusta. Käsivarren ansiosta skanneri paikansi itsensä ja mitattavan kappaleen ilman alkukalibrointia, minkä vuoksi skannauksen alkuvalmisteluihin ei kulunut paljoa aikaa.

Skannaus tapahtui hyvin yksinkertaisesti. Skanneria vietäessä lähelle kappaletta nähtiin, kuinka skannerin lähettämä laserverkko muodostui kappaleen pinnalle. Oikea skannaus etäisyys pystyttiin määrittämään liikuttamalla skanneria edestakaisin ja samalla katsoen tietokoneen ruudulta mittaria, jossa väriskaala ylhäällä ja alhaalla oli punainen ja keskellä vihreä. Skanneria tuli pitää sillä etäisyydellä, että valo paloi vihreällä. Tällöin etäisyys oli skannaustilanteelle optimaalinen. Skannausetäisyyden määrittämisen jälkeen voitiin aloittaa varsinainen skannaus. Skannaus tapahtui painamalla skannerin liipaisinta ja samalla liikuttaen skanneria. Kappaleen pinnalla näkyi koko ajan laserviiva, joka osoitti mitä kohtaa oltiin skannaamassa. Skannaustulokset piirtyivät tietokoneen ruudulle reaaliajassa, mikä helpotti skannauksen suorittamista. Koko skannaukseen kului arviolta 20–30 minuuttia. Skannauksen kestoon vaikutti varmasti kokemattomuus. Varmemmalla osaamisella mittaus pystyttäisiin suorittamaan varmasti noin 15 minuutissa. Kuvassa (10) on tietokoneen ruudulle piirtynyt skannaustulos Hexagon HP-L-20,8:lla skannattaessa.



**Kuva 10.** Hexagon HP-L-20,8:lla saatu skannaus

Haasteellisiksi kohdiksi Hexagon HP-L-20,8:lla muodostuivat NAS-kappaleessa olevat reiät. Reiän pohjan sai skannattua melko helposti skannattaessa suoraa ylhäältä päin, mutta porauksen muodostaman sylinteripinnan vaippa oli hyvin vaikea saada skannattua kokonaan. Skannauksesta jäi pakostakin ”reikiä”, joita skanneri ei tunnistanut. Näitä tyhjiä kohtia täytyi jälkikäteen paikkailla PolyWorks sovelluksella. Skannauksesta jääneitä reikiä nähdään kuvassa (10) erityisesti porausten kohdalla. Mittauksessa ongelmaksi muodostui myös se, että samaa kohtaa skannattaessa useampaan kertaan, alkoi tulos muuttua röpelöisemmäksi. Tämä johtui siitä, että PolyWorks sovellus, jota käytettiin skannauksessa apuna, pyrki sovittamaan aikaisemmat skannaukset päällekkäin, minkä vuoksi kuvaan muodostui kerroksia. Luvussa 5 on tarkasteltu lähemmin röpelöisen pinnan vaikutuksia. Toinen haaste Hexagonia käytettäessä oli saada skannattua kappaleen ja skannerin välistä sivua, sillä skannerin pitkä käsivarsi vaikeutti hyvän skannausasennon löytämistä.





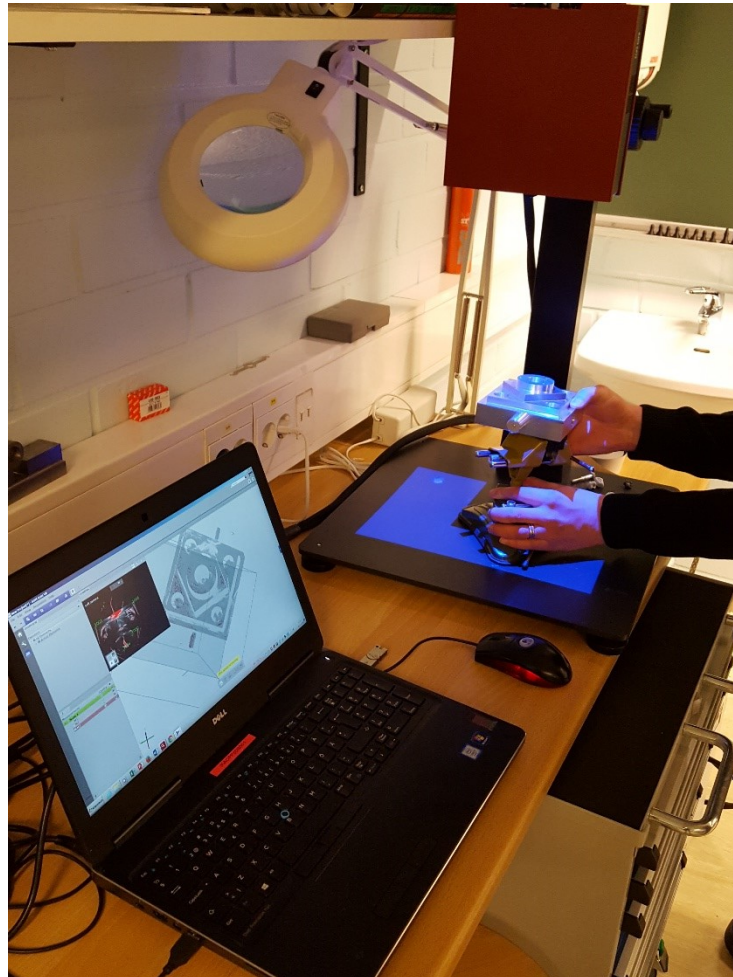
*Kuva 11. Ensimmäinen skannaus Hexagon HP-L-20.8 skannerilla*

## 4.2 GOM ATOS Core

Toinen skannaus suoritettiin GOM ATOS Corella. Skannaus suoritettiin Vammalan ammattikoululla. Hexagoniin verrattuna skannaus vaati hieman enemmän alkuvalmisteluja ja perehdytystä ohjelman ja skannerin käyttöön. Koska skanneri ei ollut liikuteltava, vaan pysyi koko skannauksen ajan paikallaan, täytyi kappale kiinnittää alustaan, joka pyöri ja jota pystyi kääntämään. Muussa tapauksessa ei olisi voitu skannata kuin suoraa ylhäältä tai sivulta. Kappaletta yritettiin aluksi skannata ilman peiteväriä, mutta alumiininen pinta kiilsi liikaa strukturoitua valoa, minkä vuoksi skannaukseen jäi paljon aukkoja, joita skanneri ei tunnistanut. Tämän jälkeen kappaleen pinnalle suihkutettiin hyvin ohut kerros pei-

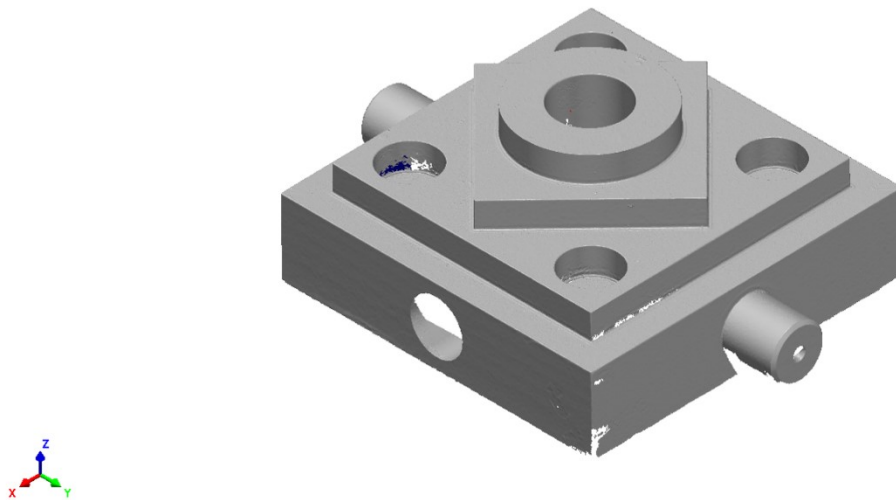
teväriä kiillon poistamiseksi. Peitevärin lisäksi kappaleen pinnalle täytyi lisätä referenssipisteitä. Skannerin täytyi aina nähdä vähintään kolme referenssipistettä kerralla, jotta se pystyi muodostamaan kappaleesta 3D-mallin.

Opittua ATOS Coren käyttöliittymän, skannaus oli hyvin yksinkertaista ja systemaattista. Skanneri lähetti kappaleen pinnalle sinistä valoa, joka oli viivastrukturoitua. Skanneri oli kytketty tietokoneeseen, jonka näytöltä näkyi jo skannatut alueet ja se mitä skannerin kamera havaitsi reaaliajassa. Skannaus ei vaatinut muuta kuin kappaleen asettamista oikeaan asentoon niin, että kolme referenssipistettä näkyi yhtä aikaa ja tietokoneen välilyönnin painallusta, jolloin skannaus tapahtui. Skanneri vaati hyvin vakaata tilaa, ja pienikin tärähdys tai liian kova ilmavirta skannerin lähellä aiheutti virhetilan, jolloin kyseinen skannaus epäonnistui ja piti suorittaa uudelleen. Vaikka skannaus suoritettiin tarkkoja mittauksia varten suunnitellussa tilassa, aiheuttivat viereisen hallin työstökoneet hieman häiriötä mittauksessa.



**Kuva 12.** Skannausasetelma GOM ATOS Corella. Tietokoneen näytöltä näkyvät reaaliaikainen kuva, sekä jo skannatut osat.

Varsinaisia ongelmia skannaukseen liittyen ei esiintynyt. Ohjelman ja skannerin käyttö oli hyvän perehdytyksen jälkeen helppoa ja vaivatonta. Porausten muodostamat sylinteripinnat olivat tässäkin skannauksessa haasteellisimpia saada, mutta peiteaineen käyttö helpotti tätä tilannetta. Kuvasta (13) nähdään, että peiteaineen ansiosta kappaleen pinnalle on jäänyt huomattavasti vähemmän aukkoja kuin ilman peiteväriä Hexagonilla suoritetussa skannauksessa. Verrattaessa Hexagonin käsivarsiskanneriin, ATOS Core oli hieman kömpelömpi käyttää, sillä se oli kiinnitetty jalustaan ja oli kuin projektori. Varsinkin, jos täytyy skannata jotain suurempaa ja painavampaa kappaletta, olisi liikuteltava skanneri tähän tilanteeseen sopivampi.



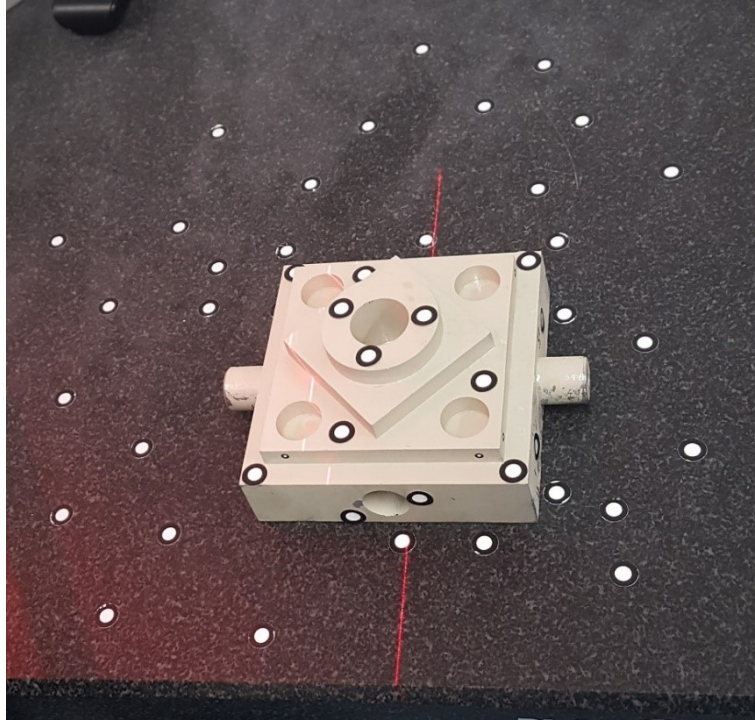
**Kuva 13.** GOM ATOS Corella saatu skannaus

ATOS Corella suoritettu skannaus oli selvästi pitkäkestoisin kaikista kolmesta skannauksesta. Skannaukseen kului noin 45 minuuttia, joka on huomattavasti pidempi kuin Hexagonin aika. Toisaalta dataa kertyi myös paljon enemmän. ATOS Coren keräämä pelkkä pistepilvi oli noin 2 gigatavun kokoinen.

### 4.3 Creaform HandySCAN

Kolmas skannaus suoritettiin Creaform HandySCANilla. Mittaus suoritettiin Tampereen Ammattikorkeakoululla. Toisin kuin Hexagon tai GOM, Creaform HandySCAN täytyi kalibroida ennen skannausten aloitusta. Kalibrointi tapahtui osoittamalla skannerilla skannerin mukana tulleet kalibrointitauluun, jossa oli referenssipisteitä. Kalibrointi

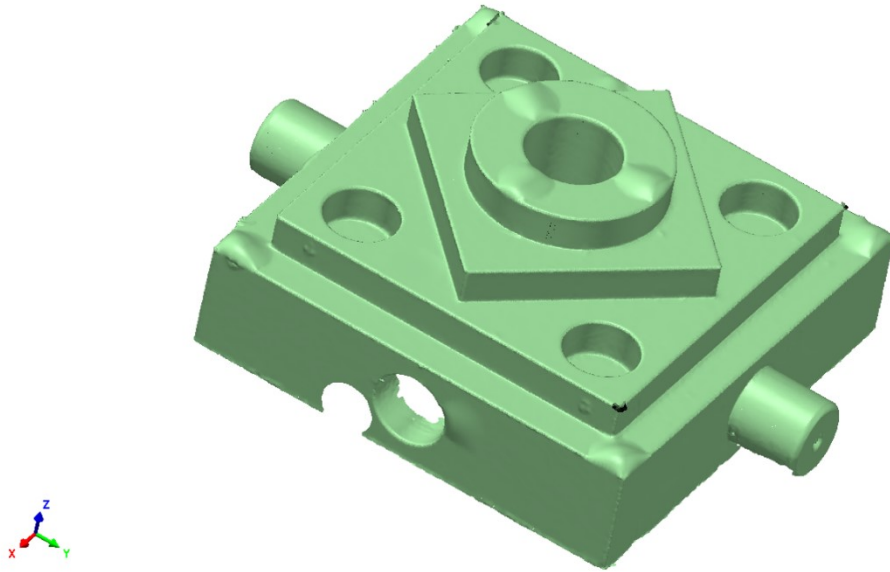
tapahtui hyvin nopeasti, minkä jälkeen NAS-kappaleen skannaus voitiin aloittaa. HandySCANilla mitattaessa täytyi jälleen käyttää referenssipisteitä apuna ja skanneri vaati myös, että 3 referenssipistettä näkyy yhtä aikaa skannerin kameraan, kuten ATOS Corrella. HandySCANilla skannattaessa kappaleen pinnalle jätettiin aikaisemmin suihkutettu peiteväri mahdollisten heijastumisten välttämiseksi. Skannaus suoritettiin mittauspöydällä, johon oli myös liitetty referenssipisteitä. Referenssipisteitä liitettiin pöytään, jotta pöytä voidaan editoida helposti pois jälkikäteen. Kuvassa (14) NAS-kappale on mittauspöydällä.



**Kuva 14.** Skannausta helpottavia referenssipisteitä kappaleen- ja pöydän pinnalla.

Skanneri oli liitetty tietokoneeseen pelkän johdon varassa, mutta oli muuten täysin vapaasti liikuteltavissa. Samoin kuin Hexagon HP-L-20,8, HandySCANilla täytyi olla tarkkana, miltä etäisyydeltä skannaus suoritettiin. Oikea etäisyys oli helppo määrittää tietokoneen näytöltä näkyvän väriskaalan perusteella. Tietokoneen näytöltä pystyttiin seuraamaan reaaliaikaisesti mitä skanneri skannasi. Skanneri käytti vakiona ristikkomaista laserkuviota kappaleen pinnalla, mutta nappia painamalla kuvion sai muutettua pelkäksi yhdeksi viivaksi. Erityisesti porausten sylinteripintojen skannaus yksittäisen laserviivan avulla kävi todella helposti.





**Kuva 15.** Creaform HandySCANilla saatu skannaus

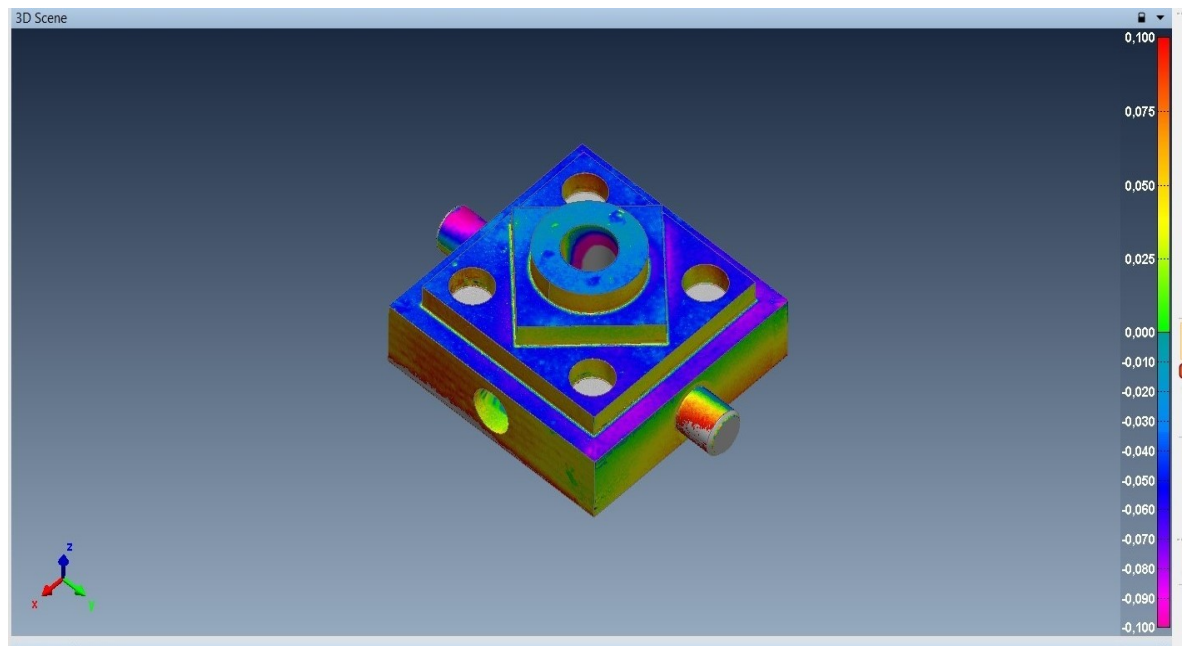
Skannaus oli hyvin nopeasti suoritettu ja koko skannaukseen kului noin 15 minuuttia, vaikka aikaisempaa kokemusta laitteen käytöstä ei ollut. HandySCAN soveltui hyvin pienen kappaleen skannaukseen, mutta on varmasti hyödyllinen myös hieman isomman kappaleen skannauksessa hyvän liikuteltavuutensa takia. HandySCANilla skannattaessa ei esiintynyt ongelmia. Jälkikäsitellyssä sen sijaan ongelmaksi muodostui referenssipisteiden automaattinen täyttö. Jostain syystä Creaformin skannaukseen suunniteltu ohjelma teki referenssipisteitä täyttäessään suuret möykät referenssipisteiden kohdalle, kuten kuvasta (15) nähdään. Lisäksi ilman syvällisempää tarkastelua huomattiin, että skannauksen tarkkuus ei ollut yhtä hyvää kuin esimerkiksi ATOS Corella tehdyssä skannauksessa. Reunat olivat epätarkkoja ja skannatun kappaleen pinnassa esiintyi paljon röpelömäistä kuviota. Luvussa 5 on esitetty ja analysoitu mittaustuloksia tarkemmin, sekä vertailtu skannereiden tarkkuuksia valmistajien antamiin mittaustarkkuuksiin.

## 5. TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

Tutkimuksessa NAS-kappaletta skannattiin kolmella eri skannerilla. Skannaustuloksia on tarkasteltu PolyWorks nimisellä sovelluksella ja skannereilla saatuja mittaustuloksia on verrattu toisiinsa sekä kappaleesta tehtyyn työkuvaan.

### 5.1 PolyWorks

Tulosten tarkastelu suoritettiin PolyWorks Inspector 2016 sovelluksella. Skannaustulokset pystyttiin avaamaan sovelluksella, kun tiedostot olivat (.stl) muodossa. Jokaisesta skannauksesta muodostettiin kuvan (16) mukainen värikartta.

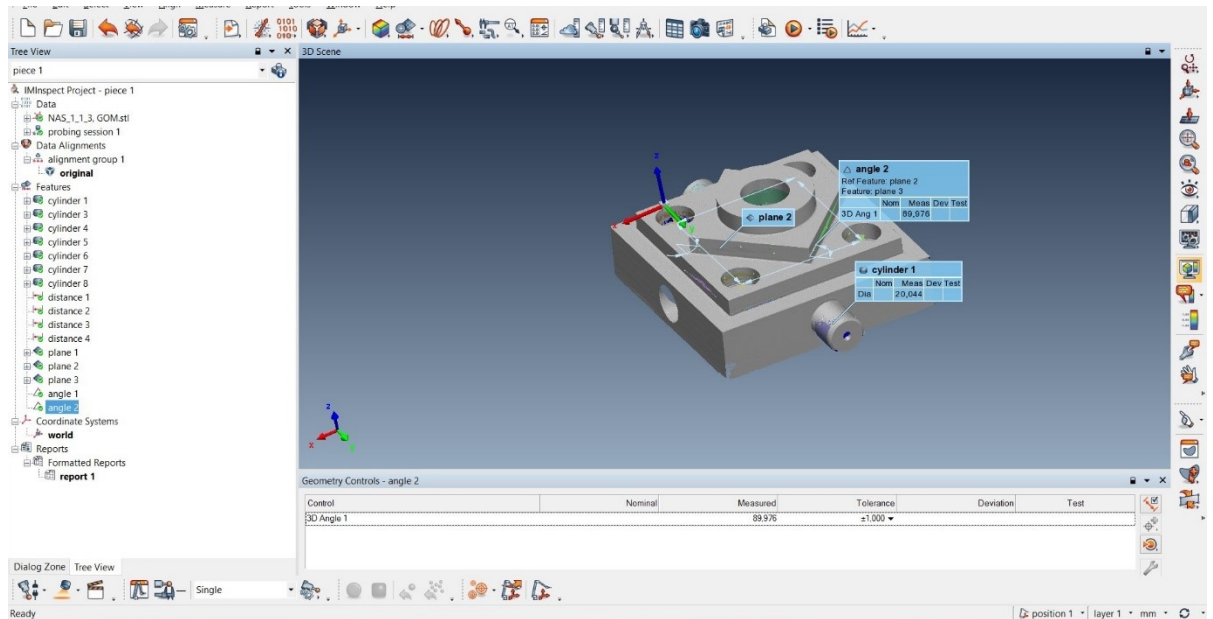


**Kuva 16.** Värikartta NAS-kappaleesta

Kuva (16) on muodostettu liittämällä skannauksella saatu malli CAD-mallin päälle, mikä oli tehty tarkoilla mitoilla. Skannattua mallia verrattiin tarkkoihin piirustuksiin ja muodostettiin värikartta skannauksen poikkeamista. Kuvasta nähdään nopeasti arvio skannauksen tarkkuudesta. Mitä enemmän värikartassa esiintyy punaista tai violetta, sen epätarkempi skannaus on ollut. Tietysti täytyy ottaa huomioon se mahdollisuus, että valmistettu kappale ei ole koskaan ollutkaan täysin identtinen tarkan CAD-mallin kanssa. Kuvassa arvoasteikko on esitetty kuvan oikeassa reunassa ja luvut ovat millimetreinä.

Mittaukset suoritettiin Inspectorin probe ominaisuudella. Ensin valittiin, minkälaisia muotoja haluttiin mitata, esimerkiksi haluttiinko sylinteripintoja vai tasoja. Seuraavaksi

valittiin probe työkalu ja aloitettiin mittaukset. Kyseisestä pinnasta, jota haluttiin mitata, täytyi ottaa vähintään kolme pistettä, jotta ohjelma pystyi tunnistamaan pinnan ja sovitamaan siihen esimerkiksi sylinterin.



**Kuva 17.** NAS-kappale PolyWorks Inspector sovelluksessa

Kuvassa (17) on esitetty eräs skannaus tarkasteltuna Inspectorissa. Kuvan vasemmassa reunassa näkyy lista toimenpiteistä, joita on tehty mittaustulosten saamiseksi. Kappaleesta on tunnistettu seitsemän sylinteripintaa, kolme tasoa sekä kaksi kulmaa. Jokaiselle skannaukselle tehtiin samanlaiset mittaukset. Ohjelman tunnistettua halutut muodot, pystyttiin helposti katsomaan, millaisia tarkkuuksia skannauksista oli tullut. Tarkemmin mittaustuloksia on esitelty alaluvussa 5.2.

PolyWorks Inspector vaati hieman opettelua etukäteen ennen kuin sillä onnistutaan saamaan mittaustuloksia. Perusnäkö sovelluksessa on melko yksinkertainen, mutta ohjeistusta esimerkiksi probe toiminnon käyttämiseen joutui hakemaan internetistä erilaisen opetusvideoiden kautta. Ohjelmassa on valtavasti erilaisia ominaisuuksia ja tässä työssä käytettiin vain murto-osaa niistä. Tarkempi perehtyminen ohjelman käyttöön vaatisi pidempiaikaista opiskelua.

## 5.2 Tulokset

Taulukossa 1 on esitetty reikien halkaisijoista saadut mittaustulokset. Jokaisessa taulukossa tulokset on esitetty samassa järjestyksessä alkaen työkuvasta, jonka jälkeen allekkain tulevat ATOS Core, Hexagon ja Creaform.

**Taulukko 1.** Reikien halkaisijat (mm)

	Reikä 1	Reikä 2	Reikä 3	Reikä 4	Kesk.reikä
Työkuva	20	20	20	20	25
ATOS Core	19,899	19,889	19,879	19,891	24,984
Hexagon	19,733	19,744	19,779	19,721	24,886
Creaform	19,905	19,894	19,878	19,881	24,988

Taulukosta 1 voidaan lukea, että suunniteltaessa kappaletta neljän pienemmän reiän halkaisijaksi on mitoitettu 20 mm ja keskireiän halkaisijaksi 25 mm. Taulukosta nähdään, että kaikilla skannereilla esiintyy poikkeamaa työkuvan mittoihin nähden. ATOS Corella saaduista tuloksista pienin poikkeama työkuvan mitoista oli 0,016 mm, Hexagonilla 0,114 mm ja Creaformilla 0,012 mm. Siihen, että Hexagonilla saadut tulokset poikkeavat kaikista eniten, vaikka käsivarsiskannerin tulokset pitäisivät olla kohtalaisen tarkkoja, vaikuttaa varmasti se, että Hexagonilla tehty skannaus oli ensimmäinen skannaus ja silloin aikaisempaa kokemusta skannauksesta ei vielä ollut. Toisaalta Hexagonilla skannatessa ei myöskään käytetty peiteväriä, jota taas käytettiin molemmissa myöhemmissä skannauksissa. Peitevärin käyttö olisi saattanut tarkentaa tuloksia. Kyseisiä tuloksia tarkasteltaessa vain Hexagon ei saavuttanut valmistajan ilmoittamaan mittaustarkkuutta. ATOS Corelle ilmoitettu tarkkuus 0,19 mm on niin suuri heitto, että täytyy tapahtua suuri vahinko, että raja ylittyisi.

Taulukossa 2 on esitetty neljän pienemmän reiän etäisyyksiä toisistaan. Reikien etäisyys on määritetty mittaamalla reikien keskipisteiden etäisyyttä toisistaan. Tulokset on esitetty samassa järjestyksessä kuin taulukossa 1.

**Taulukko 2.** Reikien etäisyydet (mm)

	Etäisyys 1-2	Etäisyys 2-3	Etäisyys 3-4	Etäisyys 4-1
Työkuva	70	70	70	70
ATOS Core	69,968	69,975	69,975	69,978
Hexagon	69,911	69,746	69,974	69,944
Creaform	69,965	69,955	69,99	69,997

Tuloksia tarkasteltaessa huomataan, että kaikkien skannereiden tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan. Hexagonin etäisyys 2–3, joka poikkeaa 0,254 mm työkuvan arvosta saattaa



olla vain yksittäinen mittausvirhe, sillä muut Hexagonilla saadut arvot poikkeavat vain 0,026–0,089 mm. ATOS Core:lla mittausten poikkeamat vaihtelevat 0,022–0,032 mm ja Creaformilla 0,01–0,045 mm. Jälleen ATOS Core:lla kaikki tulokset pysyvät valmistajan antamien tarkkuuksien sisällä. Creaformilla saaduista tuloksista vain etäisyys 2–3 ylittää valmistajan antamat rajat 0,015 mm, joka ei ole valtavan suuri poikkeama. Hexagonin tuloksista kaikki ylittävät valmistajan antaman 0,013 mm tarkkuuden. Suuria poikkeamia on saattanut aiheuttaa samat tekijät, jotka nousivat esiin reikien halkaisijoita tarkasteltaessa.

Taulukossa 3 on esitetty tappien halkaisijat. Tapeilla tarkoitetaan kuvassa (5) näkyviä kahta lieriötä kappaleen sivuilla.

**Taulukko 3.** *Tappien halkaisijat (mm)*

	Tappi 1	Tappi 2
Työkuva	20	20
ATOS Core	20,044	19,967
Hexagon	19,966	20,091
Creaform	20,063	19,948

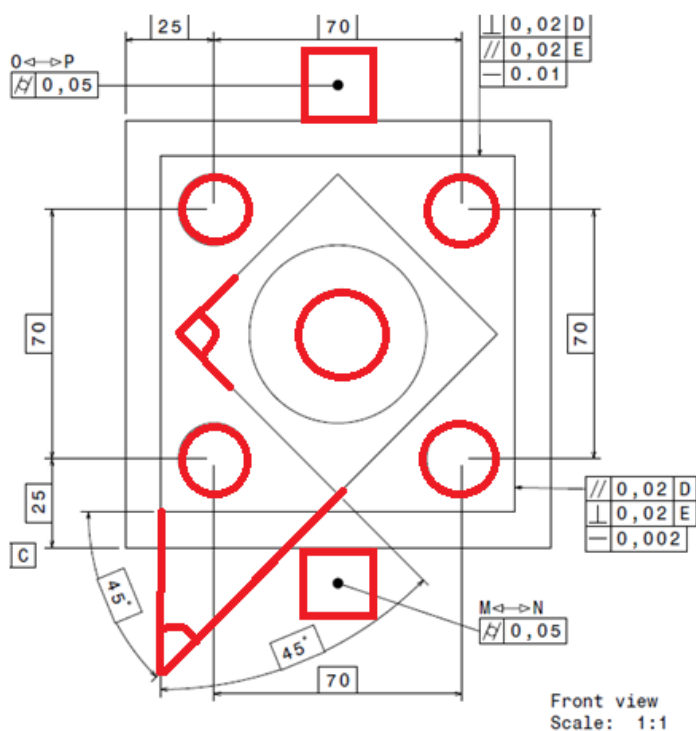
Taulukosta 3 nähdään, että tappien skannaukset ovat onnistuneet kohtalaisen hyvin. Toisin kuin reikien skannauksessa, tässä osa tuloksista on suurempia kuin työkuvassa oleva 20 mm. Mittausten poikkeamien vaihteluväli ATOS Corella oli -0,033–0,044 mm, Hexagonilla -0,034–0,091 mm ja Creaformilla -0,052–0,063 mm. Tappien skannaus oli haasteellista jokaisella skannerilla, sillä kappale pidettiin paikoillaan, paitsi ATOS Corella skannattaessa, minkä vuoksi tapin koko vaippaa ei onnistuttu skannaamaan. Erityisesti Hexagonin käsivarsiskannerilla nämä kohdat tuntuivat haastavilta.

Taulukossa 4 on esitetty kahden tarkasteltavien kulmien suuruudet. Kulmat on valittu työkuvasta siten, että kulma 1 on työkuvassa näkyvän ulomman ja sisemmän neliön välinen kulma. Kulma 2 on työkuvassa näkyvän sisemmän neliön kulmien suuruus.

**Taulukko 4.** *Kulmien asteet*

	Kulma 1	Kulma 2
Työkuva	45	90
ATOS Core	45,024	89,976
Hexagon	45,105	89,99
Creaform	45,035	89,966

Taulukosta 4 nähdään, että tulokset osuvat hyvin lähelle tavoiteltuja tuloksia. Erityisesti kulman 2 määrittäminen on onnistunut jokaisella skannerilla erittäin hyvin. Pientä poikkeamaa työkuvaan nähden esiintyy, mutta tässäkin tuloksiin vaikuttavat samat tekijät kuin aikaisempienkin tulosten tarkastelussa.



**Kuva 18.** Punaisella merkitty NAS-kappaleesta mitatut muodot

Kuvassa (18) on korostettu punaisella värillä ne piirteet, joita tämän tutkimuksen suorittamiseen on tarvittu. Kuvan (18) avulla voidaan helpommin hahmottaa mitatut piirteet ja helpottaa tulosten tarkastelua. Alkuperäinen työkuva on esitetty liitteissä.

### 5.3 Mittaustuloksiin vaikuttavia tekijöitä

Mittaustuloksiin vaikuttavat monet tekijät. Esimerkiksi Hexagonin tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon, että skannaus oli kaikista kolmesta ensimmäinen, eikä ennen tätä ollut minkäänlaista kokemusta vastaavasta skannaamisesta. Lisäksi Hexagonilla skannatessa ei käytetty peiteväriä, joka olisi saattanut tässäkin tapauksessa parantaa skannausta vähentämällä kiiltoa kappaleen pinnalla. Ylipäättään kaikissa kolmessa skannerin käytössä vaikutti merkittävästi kokemattomuus. Tuloksista saataisiin

parempia ja ne pystyttäisiin suorittamaan nopeammin, jos skanneri on käyttäjälle entuudestaan tuttu.

Jokaista skanneria käytettäessä, ympäristöstä aiheutui erilaisia häiriöitä. Pienetkin tärähdykset, sekä valaistus vaikuttavat lopputulokseen. Jokaisessa skannauksessa esille tullut röpelömäinen pinta johtui siitä kun samasta kohdasta tehtiin useampi skannaus. Käytettävä sovellus pyrkii liittämään skannaukset päällekkäin, minkä vuoksi röpelömäistä pintaa syntyy. Tämä tietysti vaikuttaa mittaustuloksiin, jos halutaan äärimmäisen tarkkoja tuloksia. Tässä työssä röpelömäisyys ei kuitenkaan aiheuttanut hirveän suuria ongelmia.

Tietysti epävarmaksi jää onko mittauksissa käytetty NAS-kappale alunperinkään työkuvan mittojen mukainen. Kappaletta valmistettaessa käytettävän työkalun ja koneen laatu vaikuttavat merkittävästi myös lopputulokseen. Tästä syystä käytetty NAS-kappale voi poiketa työkuvan mitoista suuntaan tai toiseen. Työssä mittaukset on suoritettu pelkästään optisilla skannereilla. Jotta saataisiin työkuva parempi vertailukohde, olisi NAS-kappale kannattanut skannata ensin koordinaattimittalaitteella ja sen jälkeen verrata skannereiden tuloksia tähän. Tässä työssä on kuitenkin oletettu, että NAS-kappaleen valmistuksessa ei ole tullut suuria poikkeamia suunniteltuihin mittoihin nähden ja verrattu skannereiden avulla saatuja mittaustuloksia työkuvan mittoihin. Sitomalla vertailukohta työkuvan mittoihin pystytään vertailemaan käytettyjen skannereiden mittaustarkkuuksia keskenään.

Kaikki kolme skanneria olivat hyvin erilaisia, jonka vuoksi onkin mahdotonta valita niistä parasta. Jokaisella skannerilla olisi täytynyt suorittaa useampi skannaus NAS-kappaleesta virhemarginaalin pienentämiseksi ja tulosten tarkentamiseksi. Lisäksi kaikkien skannereiden ohjelmistojen käytössä on paljon opeteltavaa ja asetuksia säätämällä päästäisiin parempiin tuloksiin.

## 6. YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä oli tarkoituksena vertailla kolmea eri skannereita ja niiden mitaustarkkuuksia. Kaikilla skannereilla skannattiin sama NAS-kappale, minkä vuoksi tuloksia oli helpompi vertailla. Tuloksia verrattiin sekä keskenään mutta myös NAS-kappaleesta tehtyyn työkuvan tarkkoihin mittoihin. Skannaustuloksia tarkasteltiin Poly-Worksilla, jolla suoritettiin myös varsinaiset mittaukset skannatuista kappaleita.

Tuloksia tarkasteltaessa huomataan, että skannereiden tarkkuuksissa ei ole suuria eroja, jos mittausvirheet jätetään huomioimatta. Mittausvirhettä työssä aiheutti kokemattomuus, sekä erilaiset ympäristöstä tulleet häirttekijät. On otettava huomioon, että työssä esitetyt tulokset perustuvat vain yhteen skannauskertaan, minkä vuoksi skannereita ei voida laittaa paremmuus järjestykseen. Kaikki skannerit soveltuvat hieman erilaisiin tilanteisiin ja niitä käytetäänkin teollisuudessa monissa sovelluskohteissa.

## LÄHTEET

- Bernardini, F. & Rushmeier, H. (2002). "The 3D Model Acquisition Pipeline", *Computer Graphics Forum*, Business Source Complete, EBSCOhost, Vol 21, No. 2, p. 149
- Boehler, W. & Marbs, A. (2002). 3D scanning instruments. *Proceedings of the CIPA WG*, 6, pp. 9–18.
- cascade.se (2017). "ATOS Core", [verkkosivu] Saatavissa (viitattu 11.3.2017): <http://www.cascade.se/fi-fi/tuotteet/jarjestelma-katsaus/atos-core>
- creaform3d.com (2017). "PORTABLE 3D SCANNER: HANDYSCAN 3D", [verkkosivu] Saatavissa (viitattu 8.1.2017): <https://www.creaform3d.com/en/metrology-solutions/portable-3d-scanner-handyscan-3d>
- Geng, H. (2015). "Additive Manufacturing or 3D Scanning and Printing", *Manufacturing Engineering Handbook*, Saatavissa (viitattu 2.11.2016): <http://accessengineeringlibrary.com/browse/manufacturing-engineering-handbook-second-edition#fullDetails>
- Hattab, A & Taubin, G. (2015). "3D Modeling by Scanning Physical Modifications", 2015 28th SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images, pp. 25–32.
- hexagonmi.com (2017). "HP-L-20.8 Laser Scanner", [verkkosivu] Saatavissa (viitattu 8.1.2017): <http://www.hexagonmi.com/products/3d-laser-scanners/hpl208-laser-scanner>
- Lykhin, E. (2015). "Why 3D Scanners Should Be Part of Your Engineering Toolbox", *Product Design & Development*.
- mitaten.fi (2015). "Creaform HandySCAN 3D, 3d-skanneri", [verkkosivu] Saatavissa (viitattu 8.1.2017): <http://mitaten.fi/3d-skannerit/creaform-3d/17-suomi/tuoteartikkelit/78-creaform-handyscan-3d.html>
- Rocchini, C. M. P. P. C., Cignoni, P., Montani, C., Pingi, P., & Scopigno, R. (2001). "A low cost 3 D scanner based on structured light." In *Computer Graphics Forum*, Vol. 20, No. 3, pp. 299–308.
- Santaluoto, O. (2012). 3D-skannaukseen perehtyminen. Opinnäytetyö. Metropolia ammattikorkeakoulu. Saatavissa (viitattu 2.11.2016): <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/45691/3D-skannaukseen%20perehtyminen.pdf?sequence=1>
- Sniredman, D. (2010). "3D Scanning 101", [verkkosivu] Saatavissa (viitattu 9.12.2016): <http://www.digitaleng.news/de/3d-scanning-101/>
- 3DScanco (2017). "3D Scanning Technical Information", [verkkosivu] Saatavissa (viitattu 7.4.2017): <https://www.3dscanco.com/3d-scanning-technical-information>

**Liite 1: NAS-kappaleen työkuva.**

